

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MINAS



*Estructura de Velocidad
Superficial
de la Ciudad de Almería
a partir del Análisis MASW*

LAURA GONZÁLEZ GARCÍA
GRADO EN INGENIERÍA DE RECURSOS MINERALES Y ENERGÍA

ESTE PROYECTO HA SIDO REALIZADO BAJO LA DIRECCIÓN Y SUPERVISIÓN DE
LOS PROFESORES:
MANUEL NAVARRO BERNAL Y PEDRO MARTÍNEZ PAGÁN.

2014

Índice general

1. Introducción	8
2. Trabajos precedentes	11
3. Metodología	13
3.1. Ondas sísmicas	13
3.1.1. Tipos de ondas	14
3.1.2. Relación entre las velocidades de ondas sísmicas y el tipo de suelo	16
3.2. Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) . . .	19
3.3. Instrumentación	22
4. Caso de estudio: Almería	26
4.1. Contexto geológico	27
4.2. Estudios previos en la zona	29
5. Resultados obtenidos y discusión	32
5.1. Resultados	32
5.2. Discusión	37
6. Conclusiones y perspectivas futuras	41
Bibliografía	43

Índice de figuras

1.1. Localización de la ciudad de Almería.	10
3.1. Algunos ejemplos de curvas de dispersión obtenidas por el método MASW.	20
3.2. Algunos ejemplos de modelos de velocidad de cizalla obtenidos por el método MASW.	21
3.3. Ejemplo de registro de las ondas sísmicas en un sismograma.	22
3.4. Sistema de arrastre porta-geófonos.	23
3.5. Fuente sísmica.	24
3.6. Landstreamer desarrollado por el Servicio Geológico de la Universidad de Kansas, USA (Véase (Park et al., 1999)).	25
4.1. Mapa que clasifica la zona de estudio en base a los materiales depositados y su morfología. 1: Zona de montaña, 2: Zona de colina con fuerte pendiente, 3: Zona de colina con pendiente suave, 4: Abanico aluvial del Pleistoceno, 5: Abanico aluvial I del Holoceno, 6: Abanico aluvial II del Holoceno, 7: Valle I, 8: Valle II, 9: Llanura de inundación, 10: Zonas bajas costeras, 11: Terrenos ganados al mar. En la figura se indica la localización de los SPACs (del A1 al A9), los perfiles MASW y los perfiles de sísmica de refracción (del S1 al S15).	28
4.2. Algunos ejemplos de curvas de dispersión obtenidas (color verde), curva de dispersión obtenida a partir del modelo inicial (color amarillo) y curva de dispersión teórica (color rojo), por el método SPAC.	30
4.3. Algunos ejemplos de modelos de velocidad de cizalla obtenidos (color rojo) y el modelo inicial utilizado (color amarillo) por el método SPAC.	30

5.1. Mapa de la zona de estudio con la situación de los perfiles MASW. . .	33
5.2. Ejemplo comparativo de perfiles de velocidad de cizalla. a) Perfil V_s en el punto A2 del método SPAC (color rojo, $V_{s30} = 317$ m/s) y el perfil V_s en la sección M1-b del método MASW (color azul, $V_{s30} = 352$ m/s); b) Perfil V_s en el punto A7 a partir del método SPAC (color rojo, $V_{s30} = 596$ m/s) y perfil V_s en la sección M13 de método MASW (color azul, $V_{s30} = 603$ m/s).	34
5.3. Mapa de valores V_{s30} a partir de los perfiles MASW para la ciudad de Almería siguiendo criterios del clasificación del suelo según el Eurocode 8 (EN, 1998).	35
5.4. Mapa de valores V_{s30} a partir de los perfiles MASW para la ciudad de Almería siguiendo unos rangos personalizados a la zona de estudio. . .	38
5.5. Mapas de distribución de la velocidad media de onda de cizalla (V_s) de la ciudad de Almería a distintas profundidades.	40

Índice de cuadros

3.1. Clasificación del tipo de suelo según el Eurocódigo 8	18
4.1. Características de las configuraciones utilizadas, curvas de dispersión, rango de valores de velocidad de cizalla y estructura promedio V_{s30} para el método SPAC.	31
5.1. Características de las configuraciones utilizadas, rango de valores de velocidad de cizalla y estructura promedio V_{s30} para el método MASW.	36

Agradecimientos

Aun a riesgo de ser más agradecida de lo que parecería necesario, me veo en la obligación (y el gusto) de querer nombrar a muchas personas aquí.

En primer lugar, y como no podría ser de otra manera, quiero agradecer a mis dos (grandes) directores de proyecto Manuel Navarro y Pedro Martínez. Por su paciencia, dedicación y enseñanzas ilimitadas, así como por sus ganas de trabajar contagiosas y por enseñarme el camino de la investigación científica y el trabajo en equipo.

En segundo lugar, querría nombrar a Guido, por las incansables horas a mi lado, por sus consejos, su ayuda y su compañía, que siempre hacen todo un poco más fácil. A mi familia, que desde el principio de mi carrera universitaria han estado apoyándome y haciendo posible el que haya llegado hasta aquí. A mi abuelo, que está ya muy mayor pero aún le quedan fuerzas para sentirse orgulloso de sus nietos y para seguir marcándonos el camino de una vida que es un ejemplo a seguir. A mi perro Ron, fallecido mientras se redactaba este proyecto, por tanto cariño y por acompañarme tantos días a correr (“mens sana in corpore sano”).

No podría olvidarme de mis compañeros Jaruselsky, Francisco y Manuel, que ayudaron en los trabajos de campo, tanto físicamente como aportando sus conocimientos, y, no menos importante, con su buena conversación y compañía. Querría nombrar también a mis compañeros de la Escuela de Minas, porque aunque no participaron en este proyecto estoy segura que el haber pasado estos años de carrera universitaria con ellos ha ayudado a que yo siga con la ilusión del primer día.

Por último, no me gustaría acabar sin nombrar aquí a aquellos profesores que durante estos años de universidad han sabido comunicarme los conocimientos necesarios y la pasión para hacer ingeniería con ellos. No pondré aquí los nombres porque

son muchos, pero estoy segura de que ellos saben quienes son. Entran en este grupo también mis coautores, a los que mi gratitud está más que justificada.

Gracias a todos.

1

Introducción

“La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.”

– *Albert Einstein*

Los terremotos ocurridos en Lorca en mayo de 2011 pusieron de manifiesto como la geología superficial jugó, entre otros factores, un papel importante en la distribución de daños observados (Alcalá-García et al., 2013; Alguacil et al., 2013; Navarro et al., 2014a), mostrando como terremotos de moderada magnitud pueden causar serios daños personales y materiales. Las características del terremoto, la cercanía a la fuente, el efecto de directividad de la ruptura y las condiciones locales del terreno han sido probadas como factores determinantes en la intensidad de los daños observados.

La velocidad media de las ondas de cizalla en los primeros 30 m (V_{s30}) ha sido adoptada en varios códigos sísmicos (p.e. NEHRP-94, NCSE-02, Eurocódigo-8) como un parámetro representativo de la respuesta sísmica del suelo. Estudios recientes (véase, p.e., (Alcalá-García et al., 2006; Martínez-Pagán et al., 2013; Navarro et al., 2014a, 2008, 2010)), han demostrado que la clasificación geológica del suelo así como sus valores V_{s30} juegan un papel fundamental en la construcción de un mapa de microzonificación sísmica urbana. El método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, conocido por sus siglas como MASW (del inglés, “Multichannel Analy-

sis of Surface Waves method”), fue desarrollado inicialmente por Park et al. (Park et al., 1999) y Xia et al. (Xia et al., 1999). Este método se ha revelado como una herramienta alternativa y efectiva en la determinación de la estructura superficial del terreno así como en la obtención de relaciones satisfactorias entre la velocidad de ondas de cizalla (V_s) y la geología local (Martínez-Pagán et al., 2012, 2013).

El presente estudio aborda la aplicación del método MASW en la ciudad de Almería, localizada en el sureste de España (Figura 1.1). Se han analizado dos grandes líneas de perfiles: una con orientación sur-norte (Avenida del Mediterráneo) y otra con orientación este-oeste (desde Calle Pedro Jover hasta Avenida Adolfo Suárez), cuyas longitudes totales fueron de 3 km y 4.1 km, respectivamente. Se ha utilizado un sistema de registro simultáneo de 24 canales y se han alternado 12 geófonos de 4 Hz y 12 de 28 Hz, espaciados en intervalos de 2 metros. El estudio se ha realizado en 24 tramos, maximizando el número de litologías analizadas en el terreno. Gracias a las características distintivas del método y a la metodología/tecnología utilizada, la toma de datos en los dos perfiles arriba mencionados se ha podido realizar en menos de una semana, obteniéndose una cantidad de información muy superior a la que se podría haber obtenido con otros métodos alternativos en el mismo periodo de medición.

La elección para la localización concreta de estos perfiles sísmicos dentro del casco urbano fue motivada por la existencia de una importante heterogeneidad lateral del terreno, su distribución a lo largo del área de estudio y la disponibilidad de datos procedentes de estudios previos a partir de técnicas complementarias, como perfiles de refracción y el método SPAC (del inglés, “Spatial Autocorrelation method”) descrito en detalle por (Okada, 2003), y cuyos resultados (Gaspar-Escribano et al., 2010; Navarro et al., 2001), han permitido contrastar y validar la técnica de MASW. Además, los resultados obtenidos han sido comparados con la información que describe las características geológicas del área de estudio, que junto a los resultados previos de velocidad de cizalla obtenidos con otras metodologías, ha sido posible obtener una clasificación del terreno con mayor detalle, en términos de V_{s30} según Eurocode 8 (Eurocode 8, EN 1998).

El presente trabajo está organizado como sigue. En el Capítulo 2 resumimos brevemente algunas importantes aplicaciones precedentes del método MASW. En el

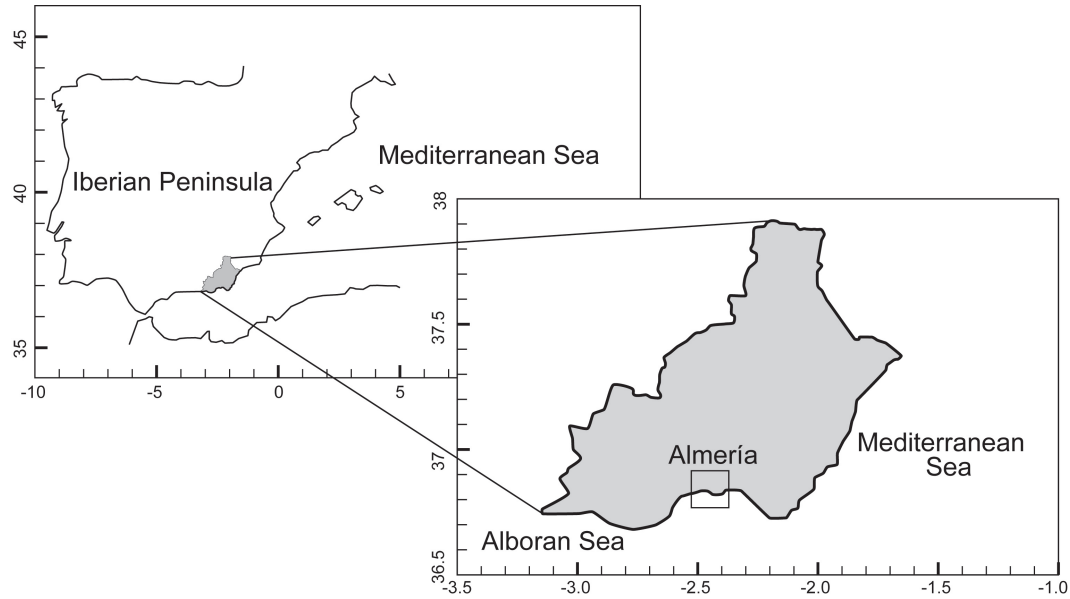


Figura 1.1: Localización de la ciudad de Almería.

Capítulo 3 explicamos la metodología utilizada, los tipos de ondas, la clasificación de los tipos de suelo, y la instrumentación empleada durante los experimentos. Seguidamente, en el Capítulo 4 describimos el área de estudio en Almería, así como los experimentos anteriores en la misma área cuyos resultados se han comparado con los nuestros. El Capítulo 5 contiene los resultados obtenidos y su discusión. El proyecto se concluye con una breve descripción de los posibles desarrollos futuros.

Cabe mencionar que el presente trabajo se ha publicado en Lisboa (Portugal) en 2014 (González-García et al., 2014) y posteriormente una continuación del mismo en Estambul (Turquía) (Navarro et al., 2014b).

2

Trabajos precedentes

“Si no conozco una cosa, la investigaré.”

– *Louis Pasteur*

El método MASW se ha aplicado en precedencia en diferentes áreas y con diversos fines. Resumimos aquí algunos de los trabajos más influyentes en este sentido.

En el año 2000, en la Refinería de Lawrenceville (Kansas), Miller et. al. (Miller et al., 2000), el equipo de la unidad de investigación sísmica de Kansas realizó un estudio aplicando el método MASW para detectar la variabilidad en la continuidad lateral de las capas cercanas a la superficie por debajo de caminos de asfalto, con el fin de detectar anomalías en el subsuelo. Si bien no pudieron corroborar sus resultados por no disponer de sondeos en la zona, sí que pudieron comprobar que detectaban cierres de baja velocidad dentro del campo de velocidades de ondas que, en la mayoría de los casos, tal como mostraban estudios previos, son indicativos de anomalías (hundimientos, fracturas, roca de fondo, etc.).

En 2004, una nueva aplicación tuvo lugar en Tacoma Water’s Green River Facility (Washington) por parte de Park y Miller (Park y Miller, 2004) en el que se realizaron dos estudios para realizar dos mapas de velocidad de cizalla antes y después de las operaciones de compactación en el emplazamiento propuesto de una instalación de tratamiento químico. Se acepta generalmente que la rigidez del suelo es proporcional a la velocidad de cizalla, pudiendo comparar así la mejora del suelo tras su compactación.

En 2005 el Servicio Geológico de la Universidad de Kansas aplicó el método en Elk County (Kansas) para la caracterización sísmica del terreno de una planta eólica a fin de seleccionar el futuro emplazamiento de la turbina (Park y Miller, 2005). Se evaluaron aquí nuevamente, mediante los datos aportados por el método MASW, la rigidez del suelo y la posible existencia de zonas débiles, como huecos y zonas fracturadas. En el mismo año, en otro trabajo se estudiaron los mejores parámetros para maximizar la fiabilidad de la metodología. Se estableció así el límite inferior teórico de la longitud de propagación al receptor por debajo de la cual no se resolverá adecuadamente el cálculo de la velocidad de cizalla (V_s) (Park, 2005).

Otros lugares de interés donde se ha aplicado el método MASW incluyen la base aérea militar de Maxwell (Montgomery, Alabama), en 2006 (Xia, 2006). En esta ocasión se pudieron detectar las características geológicas superficiales del terreno que revelaron un posible canal enterrado y los distintos tipos de rocas presentes a lo largo del terreno. Cabe destacar, que los autores afirman que normalmente las mediciones con el método MASW poseen entre un 10 y un 15 % de error en comparación con las mediciones de pozos directos (Xia et al., 2002). Por lo tanto, cualquier persona que interpreta la velocidad de las ondas S y las secciones de velocidad residual debe ser consciente de la incertidumbre y estas limitaciones.

Finalmente, en 2014, el método MASW se ha aplicado a la ciudad de Lorca (España) (Martínez-Pagán et al., 2014). En esta ocasión se trabajó sobre el parámetro V_{s30} para crear un mapa de clasificación del suelo de la ciudad pudiendo correlacionar los materiales superficiales de los primeros 30 metros con el grado de daños ocurridos en la ciudad tras el terremoto de mayo de 2011.

3

Metodología

*“Si quieres encontrar los secretos del Universo
piensa en términos de energía, frecuencia y vibración.”*

– Nikola Tesla

En este capítulo vamos a detallar la metodología utilizada en el resto del proyecto. Antes de todo, vamos a recordar los principios básicos de las ondas sísmicas, con particular atención a las ondas superficiales y a la clasificación de los tipos de suelo. Seguidamente, describiremos el método de análisis multicanal de las ondas superficiales (MASW), y, finalmente, detallaremos la instrumentación que hemos utilizado en la toma de datos.

3.1. Ondas sísmicas

La Sismología es la rama de la Geofísica que abarca el estudio de las ondas sísmicas que se mueven a través y alrededor de la tierra. Las ondas sísmicas que se generan en prospección sísmica se comportan como energía de deformación elástica que se propaga en todas direcciones a partir de la fuente sísmica. Un modo usual, rápido y sencillo, de generar un impulso sísmico artificial es golpear con un martillo una plancha de acero situada sobre la superficie del terreno, o bien dejar caer un peso. El *sismograma* que, así generado, registra el geófono es muy complejo, en parte debido a que se originan simultáneamente varios tipos de ondas elásticas que se propagan

a diferentes velocidades y en parte porque cada uno de estos tipos de ondas puede, por reflexión y refracción, llegar al geófono siguiendo trayectorias diferentes.

3.1.1. Tipos de ondas

En un terreno elástico, si se ejerce una presión instantánea en un punto próximo a la superficie se originaran tres impulsos elásticos que se propagan con diferentes velocidades. Dos de éstos impulsos son las *ondas de volumen* que se propagan según frentes esféricos hacia el interior del terreno, y el tercer impulso corresponde a una *onda superficial* cuya propagación se limita a la zona próxima a la superficie libre del terreno, ya que su amplitud decrece rápidamente al penetrar hacia el interior del medio.

Ondas volumétricas

Nos referimos aquí a aquellas ondas sísmicas que necesitan de un medio sólido para propagarse, así pues, se transmiten a través del subsuelo. Hay dos tipos de ondas volumétricas que se diferencian según su dirección de propagación cuando se produce el movimiento del terreno.

Las *ondas primarias* u ondas P se transmiten en la dirección de propagación de la onda por acciones de deformación de compresión-tracción. Sometida a una onda P, una partícula se mueve oscilando en la misma dirección que la onda. Este tipo de ondas pueden moverse a través de rocas sólidas o líquidos, como el agua, el magma volcánico o las capas líquidas de la tierra. Es la más rápida de las ondas internas y por tanto son las primeras en ser registradas en una estación sísmica. El segundo tipo de ondas de volumen son las *ondas secundarias* u ondas S. Las ondas S someten al medio a un esfuerzo de cizalladura y se caracterizan por propagarse en un sentido perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Así pues, una partícula alcanzada por este tipo de onda oscila en torno a su posición original dentro de un plano perpendicular a la dirección de propagación. Una onda S es más lenta que las ondas P, llegando en segundo lugar en el sismograma, y puede moverse a través de roca sólida pero no a través de cualquier medio líquido.

Las velocidades de las ondas sísmicas P y S, V_p y V_s respectivamente, dependen

de la densidad y las propiedades elásticas de las rocas y el suelo que atraviesan, según las relaciones:

$$V_p = \sqrt{\left(k + \frac{4}{3}\mu\right)/\rho} \quad (3.1)$$

$$V_s = \sqrt{\mu/\rho} \quad (3.2)$$

donde k es el módulo de compresibilidad, μ es el módulo de rigidez y ρ la densidad del medio. De las expresiones (3.1) y (3.2) se deduce que las ondas P son más rápidas que las ondas S para un mismo medio y que el valor del cociente V_p/V_s , obtenido por:

$$V_p/V_s = \left[\frac{2(1 - \sigma)}{(1 - 2\sigma)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

sólo depende del coeficiente de Poisson (σ). Así pues, podemos deducir el coeficiente de Poisson y los módulos elásticos del terreno a través de los valores de velocidades de las ondas volumétricas, información que nos permite la caracterización litológica y geotécnica del subsuelo.

Ondas superficiales

Las ondas superficiales se denominan así porque su movimiento está restringido a la superficie del suelo. Viajan sólo a través de la corteza y se propagan paralelas a la superficie libre del medio. En los sismos poco profundos son las que transportan más energía y las de mayor efecto destructor. A pesar de que llegan después de las ondas de volumen, son casi enteramente responsables de los daños y la destrucción asociada a los terremotos.

Existen básicamente dos tipos de ondas superficiales: las ondas *Rayleigh* y las ondas *Love*. Estas ondas juegan un papel muy importante en la sismología porque permiten obtener estimaciones del momento sísmico y de la profundidad focal de sismos remotos, si bien recientes estudios emplean ya métodos en los que se pueden calcular también sólo con datos de ondas primarias, o con datos de ondas primarias y Rayleigh (Rueda y Mezcua, 2004). El primer tipo de ondas de superficie es la

onda *Rayleigh*, en nombre de John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh, quien matemáticamente predijo la existencia de este tipo de onda en 1885. Este tipo de onda aportará a las partículas alcanzadas un movimiento elíptico en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda dentro de un plano vertical con respecto a la superficie. Las ondas *Love* son más rápidas que las ondas Rayleigh y por lo tanto se detectan antes en el sismograma. El movimiento de una partícula alcanzada por esta onda es paralelo a la superficie pero perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas superficiales, en la práctica, son ondas dispersivas, esto es, la onda cambia su frecuencia al viajar por medios de diferentes velocidades. Esta característica es interesante recordarla, pues en ella nos centraremos para poder analizar los diferentes materiales y sus propiedades en este estudio.

3.1.2. Relación entre las velocidades de ondas sísmicas y el tipo de suelo

La velocidad de las ondas sísmicas no es constante, pues varía de unas rocas a otras según su densidad y sus módulos elásticos. Aunque la densidad es una característica física que depende de las variaciones de la composición de la roca así como de su porosidad y de los fluidos que contiene, con el fin de poder estimar una relación entre una velocidad y una roca concreta partiremos de una simplificación de la densidad. Así pues, determinamos que la densidad, junto con otras propiedades de la roca, se entiende por el valor promedio de toda la roca en su conjunto, asumiendo roca, poros y fluidos. El conocimiento de las velocidades de ondas P y S en los materiales nos va a permitir obtener secuencias litológicas, la naturaleza de los fluidos contenidos en el terreno y, como este estudio pone de manifiesto, un mapa de microzonificación sísmica que permita adaptar las normativas sismorresistentes de construcción. El objetivo de las normativas sismorresistentes es, primeramente, evitar la pérdida de vidas humanas y, como segunda prioridad, reducir el daño y el coste económico que puedan ocasionar los terremotos futuros. Las normas proporcionan unos criterios y recomendaciones para dotar a las estructuras de suficiente resistencia de modo que no sufran daños relevantes ante sacudidas sísmicas pequeñas, puedan

resistir sin daños estructurales ante movimientos sísmicos moderados y puedan evitar el colapso, aunque sufran posibles daños, ante las sacudidas más fuertes previsibles con una probabilidad razonable.

Los conocimientos sismorresistente se remontan al siglo XVI en Latinoamérica, cuando fue publicada una real orden que obligaba a tener en cuenta los efectos que producían los terremotos y a construir en consonancia. En España ([Gobierno de España, 2014](#)), los antecedentes son bastante más recientes: con ocasión del terremoto de Torrevieja en 1829, se emitieron informes técnicos de construcción antisísmica en los que se hacía hincapié en que en la reconstrucción de los pueblos afectados se aumentara la anchura de las calles, se redujese la altura de las casas a un solo piso y la no inclusión de elementos exteriores decorativos como remates o cornisas. Años más tarde, tras la catástrofe que produjo el llamado terremoto de Andalucía de 1884, el Gobierno formó una comisión que estudió el terremoto y analizó las medidas a tomar. Para la reconstrucción de la zona dañada, se siguieron unas normas mínimas de sismorresistencia, que se referían fundamentalmente al emplazamiento y a la planificación del conjunto urbanístico. En la reciente historia española del siglo XX sobre este tema, el 21 de marzo de 1952, por orden del Ministerio de Hacienda se estableció que los daños ocasionados por un terremoto, a efectos de seguros, se calificasen de riesgo catastrófico cuando la intensidad del sismo fuera igual o superior a VII en la escala de Mercalli. Más tarde, en 1962, el Ministerio de la Vivienda publica la “Norma M. V.101-1962” en el que se incluye por primera vez un mapa de zonas sísmicas. En ese mismo año se había creado una Comisión Interministerial encargada de formular las Normas sismorresistentes y cuyo trabajo cristalizó en la Norma Sismorresistente PGS-1 (1968). Asimismo, en 1967 el Ministerio de Obras Públicas publicó la “Instrucción para Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas”, en las que se tienen en cuenta las acciones sísmicas. En 1974 se aprueba la Norma Sismorresistente PDS-1, así como la constitución de la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Se trataba de una norma moderna que supuso un importante avance técnico y que ha sido la base de las posteriores normas españolas. Obligaba al cumplimiento de la norma según zonas sísmicas en España, de acuerdo con un mapa de peligrosidad expresado en valores de intensidad sísmica. Desde este momento, las normas deberían incluir una zonificación del territorio, indicando

V_{s30} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
> 800	A	Roca u otras formaciones rocosas, incluyendo como máximo 5m de material más blando en la superficie.
$360 - 800$	B	Depósitos de arena/grava muy densa o de arcilla rígida, con un mínimo de varias decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad
$180 - 360$	C	Depósitos de arena/grava medianamente densa o de arcilla rígida, con espesores desde varias decenas a cientos de metros.
$0 - 180$	D	Depósitos de suelo de poca a mediana cohesión (con o sin algunas capas cohesivas suaves).

Cuadro 3.1: Clasificación del tipo de suelo según el Eurocódigo 8

las características de los sismos máximos que han de considerarse; unos métodos de cálculo y unas recomendaciones de uso obligado, o no, dependiendo de las zonas y de las construcciones. Por último, el antecedente más inmediato a la norma actual fue la Norma NCSE-94, publicada en 1995, que supuso también un gran avance al incluir un mapa de peligrosidad sísmica de tipo probabilista resultante de una profunda revisión de la sismicidad española.

La Norma actualmente vigente, denominada NC SE-02, ha sido elaborada por una Subcomisión integrada por expertos de arquitectura, ingeniería, sismología, geología, etc., y aprobada por la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, presidida por el Director General del Instituto Geográfico Nacional. En su redacción se han tenido en cuenta las directrices europeas en materia de construcción sismorresistente, haciendo compatible la nueva Norma con el Eurocódigo. En el presente estudio hemos tomado como referencia a nuestros datos las tablas de valores aportadas por el Eurocódigo 8 ([Eurocode 8](#), [EN 1998](#)) para diseño sísmico en estructuras, clasificando así el suelo de la ciudad de Almería según las velocidades de onda sísmica y el tipo de suelo (véase Cuadro 3.1).

3.2. Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

En los últimos años el uso de ondas superficiales se ha venido utilizando, cada vez más, para el estudio de microzonificación sísmica del terreno así como para la caracterización geotécnica del subsuelo. La caracterización local para la estimación de los riesgos sísmicos normalmente recae sobre los valores de velocidad de cizalla de las ondas superficiales. Por ello, el parámetro V_{s30} ha sido aceptado para la clasificación local por los principales organismos internacionales en el establecimiento de normativas sismorresistentes como es el National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP, 2001) en los Estados Unidos, o el Eurocode 8 (Eurocode 8, EN 1998) en Europa. De hecho, el International Building Code (IBC) publicó la misma designación de clasificación en el año 2000 estableciendo al parámetro V_{s30} como una medida que debía tenerse en cuenta en el diseño estructural de las edificaciones. Bajo estos objetivos, la metodología elegida en el presente estudio está basada en la obtención de los rangos de valores para la velocidad de las ondas de cizalla del subsuelo de la ciudad de Almería a través del empleo del Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) (Park et al., 1999).

El método MASW fue desarrollado para superar algunas de las limitaciones de los métodos que se venían empleando hasta la fecha. Tiene fundamentalmente dos grandes ventajas. Primeramente requiere de mucho menos tiempo en el área de estudio, puesto que la fuente y los geófonos se deben utilizar sólo una vez, tomando un único registro instantáneo en cada posición. Esta cualidad lo convierte en un método rápido y económico frente a otros métodos tradicionales. La otra ventaja principal la obtenemos del hecho de que las fuentes de ruido emiten a menudo campos de ondas que se registran simultáneamente en una fila de geófonos espaciados regularmente. El ruido es identificado por su contenido de frecuencia y su registro a través de la fila de geófonos, pudiendo diferenciarlo y aislarlo de las ondas Rayleigh y consiguiendo, finalmente, una mayor precisión en la estimación de las características de dispersión. Así pues, uno de los objetivos del método MASW es identificar traza a traza las llegadas de información coherente que no son ondas Rayleigh y eliminarlas de los registros de datos. Seguidamente las propiedades dispersivas de las ondas Rayleigh podrán ser

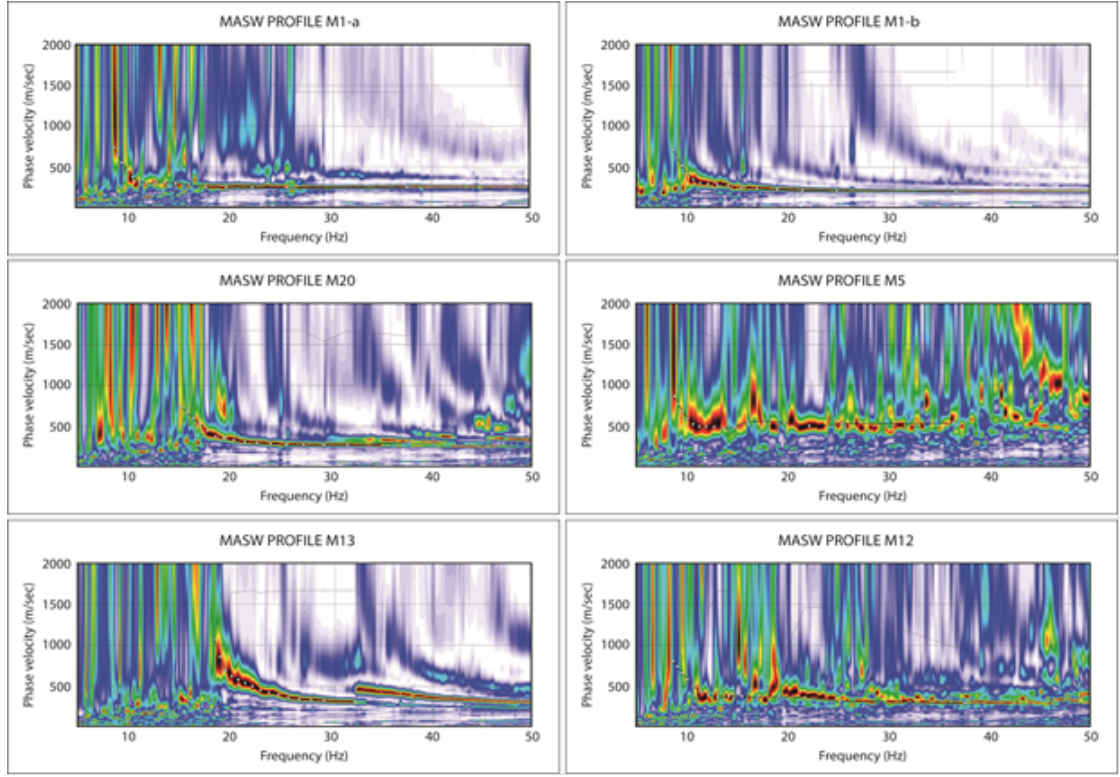


Figura 3.1: Algunos ejemplos de curvas de dispersión obtenidas por el método MASW.

analizadas proporcionando información útil sobre las características geotécnicas del subsuelo (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2008).

Ahora vamos a detallar el procedimiento general para la obtención de las propiedades de dispersión de las ondas superficiales generadas por una fuente sísmica. Supongamos que obtenemos un registro sísmico, el campo de onda registrada queda definido por $u(x, t)$, donde x es el desplazamiento TX-RX (distancia entre la fuente sísmica y el geófono), y t denota el tiempo. Si aplicamos ahora una transformada de Fourier al campo de onda se obtiene $\tilde{u}(x, \omega)$ donde ω es la frecuencia angular. El dominio de la frecuencia del campo de onda se puede escribir en la forma estándar:

$$\tilde{u}(x, \omega) = A(x, \omega) \exp[-i\Phi(\omega)x] \quad (3.4)$$

donde $A(x, \omega)$ es la amplitud del espectro. La función $\Phi(\omega)$ puede ser vista como un

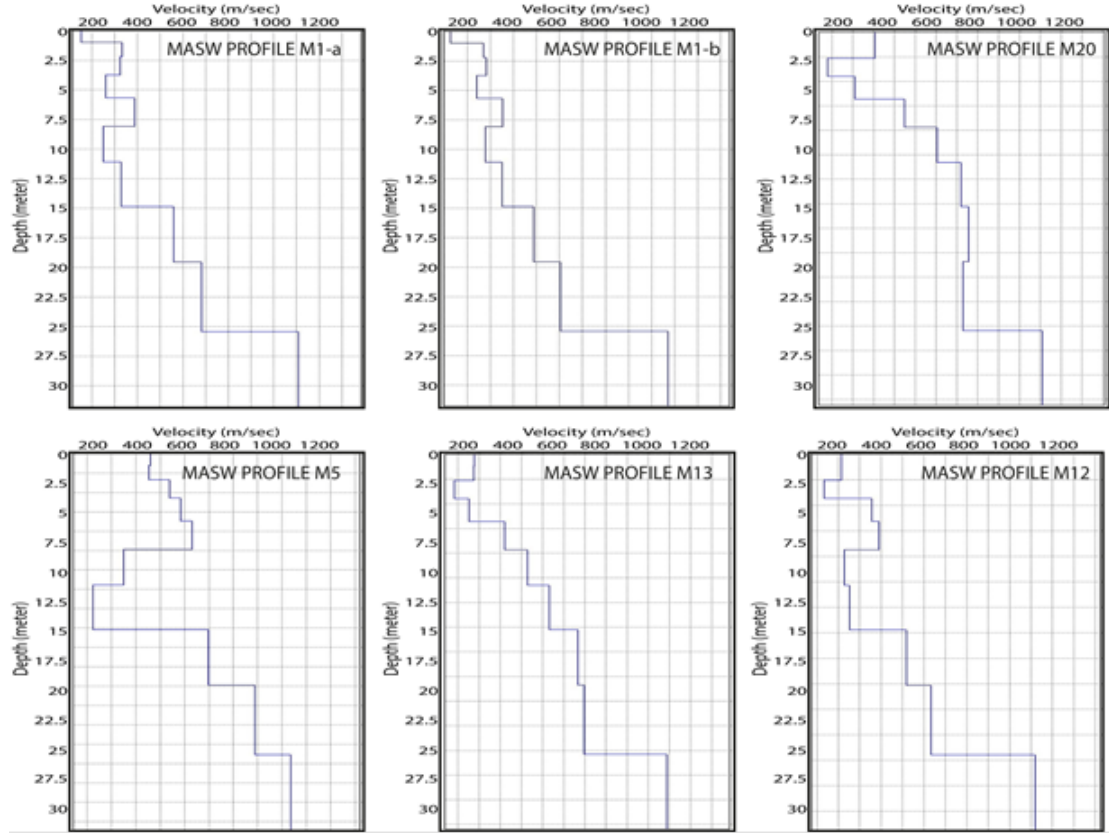


Figura 3.2: Algunos ejemplos de modelos de velocidad de cizalla obtenidos por el método MASW.

tipo de espectro numérico de onda si identificamos $\Phi(\omega)$ con $\frac{\omega}{V_{ph}(\omega)}$, donde V_{ph} es la velocidad de fase de la onda superficial a la frecuencia ω . Seguidamente, definimos una nueva función $\tilde{v}(\omega, \phi)$ siguiendo la transformación lineal:

$$\tilde{v}(\omega, \phi) = \int_{x_1}^{x_2} \exp(i\phi x) \frac{\tilde{u}(x, \omega)}{|\tilde{u}(x, \omega)|} dx \quad (3.5)$$

donde x_1, x_2 son, respectivamente el mínimo y el máximo desplazamientos TX-RX de los receptores. Se observa que la ecuación (3.5) involucra una modificación de la fase dependiente del desplazamiento $\exp(i\phi x)$ acoplada con una integración. La transformación involucra también una normalización de $\tilde{u}(x, \omega)$ en el denominador; esto se usa para compensar los efectos de la atenuación y la divergencia esférica. Si insertamos (3.4) en (3.5) se obtiene:

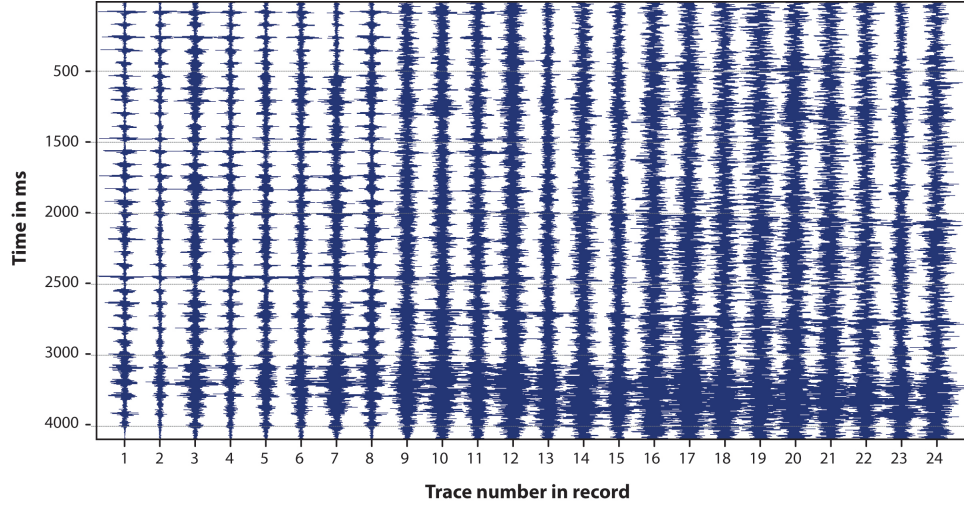


Figura 3.3: Ejemplo de registro de las ondas sísmicas en un sismograma.

$$\tilde{v}(\omega, \phi) = \int_{x_1}^{x_2} \exp(-i[\Phi - \phi]x) \frac{A(x, \omega)}{|A(x, \omega)|} dx. \quad (3.6)$$

Es fácil ver que el valor de la ecuación alcanza un máximo cuando $\phi = \Phi$. Esto sugiere que variando ϕ para una determinada frecuencia ω , los máximos de $\tilde{v}(\omega, \Phi)$ corresponden a los valores $\phi = \Phi = \frac{\omega}{V_{ph}}$, y por lo tanto, se puede determinar la velocidad de fase V_{ph} para la frecuencia ω . Juntando los valores máximos de $\tilde{v}(\omega, \phi)$ para diferentes frecuencias ω se obtienen las características de la dispersión modal. Los valores máximos pueden ser visualizados en una imagen bi-dimensional de $\tilde{v}(\omega, \phi)$ conocida como curva de dispersión (véase Fig. 3.1). Un mayor detalle sobre los fundamentos teóricos del método MASW se puede encontrar en (Roma, 2010).

En este estudio, para la aplicación del método MASW, se establecieron dos líneas principales de perfiles MASW en direcciones este-oeste y sur-norte, de 3.0 y 4.1 km de longitud, respectivamente, a través del casco urbano de la ciudad de Almería.

3.3. Instrumentación

La caracterización local del terreno para la estimación de los riesgos sísmicos recae normalmente sobre los valores de velocidad de las ondas de cizalla. Para su obten-



Figura 3.4: Sistema de arrastre porta-geófonos.

ción en la ciudad de Almería, como se ha indicado anteriormente, se establecieron dos líneas principales de perfiles MASW a través del casco urbano. Para la realización de estas dos líneas sísmicas se empleó un sistema propio de arrastre porta-geófonos, comúnmente conocido por su terminología anglosajona de *landstreamer* (véase Fig. 3.4 y Fig. 3.6). El landstreamer está formado por dos mangueras, de 25 metros de largo cada una, con un cableado interior que permite la conexión de un geófono cada 2 metros.

Los *geófonos* son los dispositivos encargados de detectar la llegada del frente de ondas y convertir, ese movimiento del terreno en una señal eléctrica. Estos captadores sísmicos están compuestos por una bobina de hilo conductor suspendida dentro de un imán permanente. Cualquier desplazamiento del suelo causará un movimiento de la bobina en el seno del campo magnético. Este movimiento produce un voltaje que es enviado al equipo de medida (sismógrafo) como señal eléctrica bruta antes de ser procesada electrónicamente. El sistema de acoplamiento de geófonos en nuestro landstreamer permitió el registro simultáneo de veinticuatro canales en modo continuo, con un paso de desplazamiento de 10 metros. Estos canales se dispusieron de manera

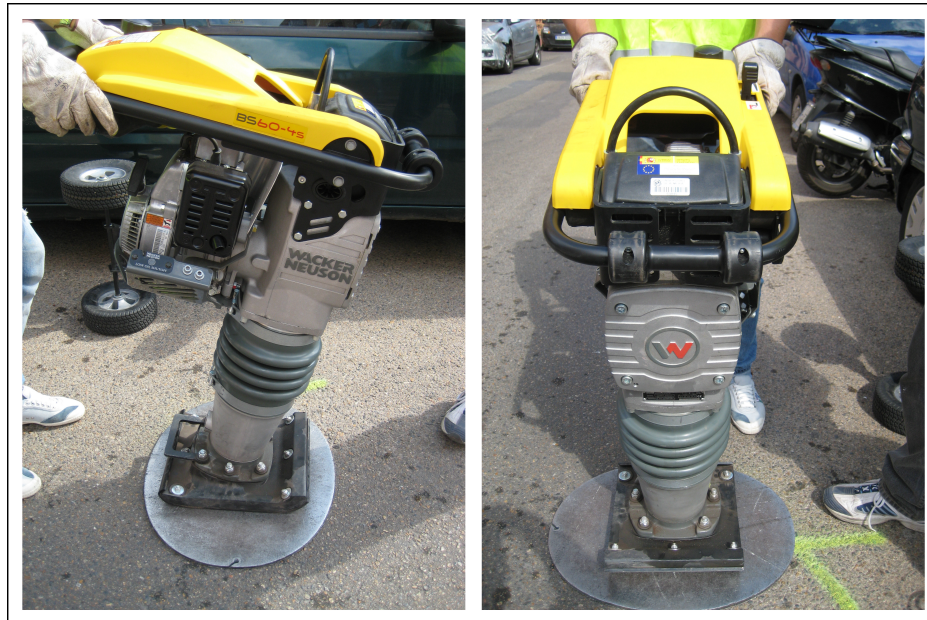


Figura 3.5: Fuente sísmica.

que las trazas alternaran entre la señal recibida por los doce geófonos de 28 Hz y los doce geófonos de 4.5 Hz. La separación entre los geófonos fue de 2 metros y la distancia entre la fuente y el primer geófono, conocida como offset, fue de 4 metros. La configuración anterior permitió obtener registros con una relación señal-ruido excelente (Figura 3.3), además de permitir mayores profundidades de investigación de las que se habrían obtenido empleando sólo geófonos de 28 Hz para la misma fuente de energía.

Como fuente de energía no-explosiva se empleó un vibrador-compactador Wacker-Neuson Modelo BS 60-4s (Figura 3.5). Los golpes fueron provocados sobre una plancha metálica de modo que se evitara cualquier daño sobre el asfalto o el terreno, pudiendo así hacer mediciones no destructivas y posibilitando las mediciones en el centro urbano de la ciudad. La unidad de registro está compuesta por un sismógrafo Summit II Compact de DMT (Alemania). Por otro lado, tanto la configuración de la secuencia sísmica empleada como el procesado posterior de los datos sísmicos se llevaron a cabo con el uso del paquete de programas denominado SurfSeis, del Servicio Geológico de la Universidad de Kansas (EEUU).

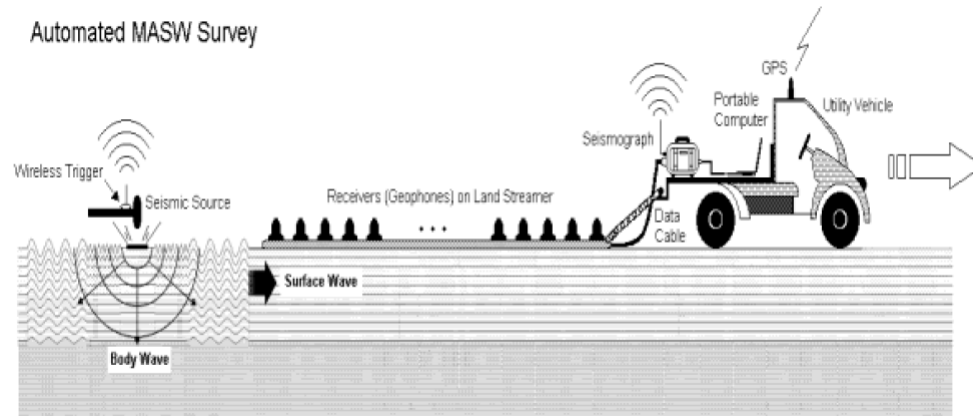


Figura 3.6: Landstreamer desarrollado por el Servicio Geológico de la Universidad de Kansas, USA (Véase (Park et al., 1999)).

El tratamiento de los datos ha consistido básicamente en identificar para cada punto disparo, en este caso punto de vibración, la curva de dispersión para el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Una vez obtenidas todas las curvas de dispersión pertenecientes a un mismo perfil MASW han sido sometidas de forma individual a un proceso matemático de inversión con el fin de obtener los perfiles V_s en una dimensión (1D). A continuación, con todos los perfiles 1D de V_s se han elaborado las secciones sísmicas 2D de valores de velocidad de las ondas de cizalla superficiales correspondientes a cada uno de los perfiles MASW. Finalmente, con los datos procesados también se ha calculado y dibujado curvas de valores V_{s30} . Es importante destacar que el landstreamer permitió el registro de siete kilómetros de perfil MASW en menos de una semana, lo que supone importantes ventajas en tiempo, coste y en una mínima afección sobre el tráfico rodado. Con el fin de dar una idea más precisa del rendimiento alcanzado, comentar que estos siete kilómetros de perfiles MASW han supuesto la obtención de unas setecientas curvas de dispersión o la generación de setecientos perfiles 1D de estructura V_s .

4

Caso de estudio: Almería

*“La verdadera grandeza de la ciencia
acaba valorándose por su utilidad.”*

– Gregorio Marañón

La ciudad de Almería se encuentra en el sureste de España, en la provincia de mismo nombre que pertenece a la Comunidad Autónoma de Andalucía. Data del año 955 d. C. en el que fue fundada por Abderramán III y, a día de hoy, su población ya es aproximadamente 190.000 personas y su extensión cuenta con unos 295 km².

En Almería y su provincia han sucedido algunos terremotos destructores, de los que existe constancia en sus documentos históricos (Allés Abad, 2013; Vidal, 1986), si bien, la información para estos eventos, que ocurrieron con anterioridad al siglo XV, es escasa y a veces tergiversada por condicionamientos religiosos de la época o de poco rigor científico. Sin embargo, constituyen el único testimonio de la actividad sísmica más importante de ese periodo. Un ejemplo de terremoto destructor en la zona de estudio lo tenemos en el de 22 de septiembre de 1522. En la ciudad de Almería quedaron destruidos la Catedral y otros templos, parte de la muralla y la Alcazaba, el puerto, gran número de casas y afectando también a otras ciudades más distantes como Cuevas de Almanzora, Baza, Guadix y Granada. A lo largo de los últimos años se han ido sucediendo en la costa almeriense series sísmicas relacionadas con la falla Serrata-Carboneras, concentrándose en la zona del Mar de Alborán, situada cerca del golfo de Almería y frente a las costas de Roquetas de Mar, llegándose a registrar

terremotos de magnitud superiores a 4 (escala de Richter) (Instituto Andaluz de Geofísica, 2014).

Cabe destacar que la actividad sísmica de Almería es principalmente de tipo superficial. Así, en un estudio de los terremotos en Almería (Allés Abad, 2013) durante el periodo entre 1991 y 1993 se apreció que la máxima actividad se concentra en los primeros 20 km de la corteza. Se localizaron 255 terremotos en profundidades comprendidas entre 0 km y 5 km, y 240 cuya profundidad estaba comprendida entre 5 km y 20 km; sólo 31 tenían una profundidad mayor que 20 km pero en ningún caso se alcanzan los 100 km. Podemos afirmar, en general, que la zona de estudio es bastante activa sísmicamente, con terremotos de baja magnitud principalmente, pero con presencia de terremotos de magnitud moderada de manera regular.

4.1. Contexto geológico

Para una mayor comprensión de la zona que abarca este estudio, se detalla a continuación la geología de la ciudad de Almería con los distintos materiales que componen el terreno y su morfología. Podremos así estudiar más adelante la relación existente entre los depósitos materiales existentes y las velocidades de propagación de onda.

La zona estudiada se compone principalmente de dos unidades tectónicas: el complejo Alpujárride y Neógeno y materiales del Cuaternario (Aldaya y García Dueñas, 1971). El mapa de clasificación del terreno (véase Fig. 4.1) muestra 11 tipologías diferentes (Navarro et al., 2001), comprendidas entre terrenos montañosos formados por rocas Pre-Pliocenas y tierras bajas costeras formadas por depósitos del Holoceno (arenas, arcillas y limos). Dominan dos abanicos aluviales: el abanico de la rambla de Belén (abanico aluvial Holoceno I, código 5 en la Figura 4.1) que se extiende desde una cota de altura de aproximadamente 50 metros hasta la costa con una pendiente media de alrededor de un 25 por 1000; el segundo corresponde al río Andarax (abanico aluvial Holoceno II, código 6 en la Figura 4.1). La cota del río Andarax está situada en un punto con una altura de 40 metros. Este abanico es más grande que el de la rambla Belén y tiene una inclinación más suave con una pendiente de un 11 por 1000. Ciudad Jardín, situado en la llanura de inundación (código 9

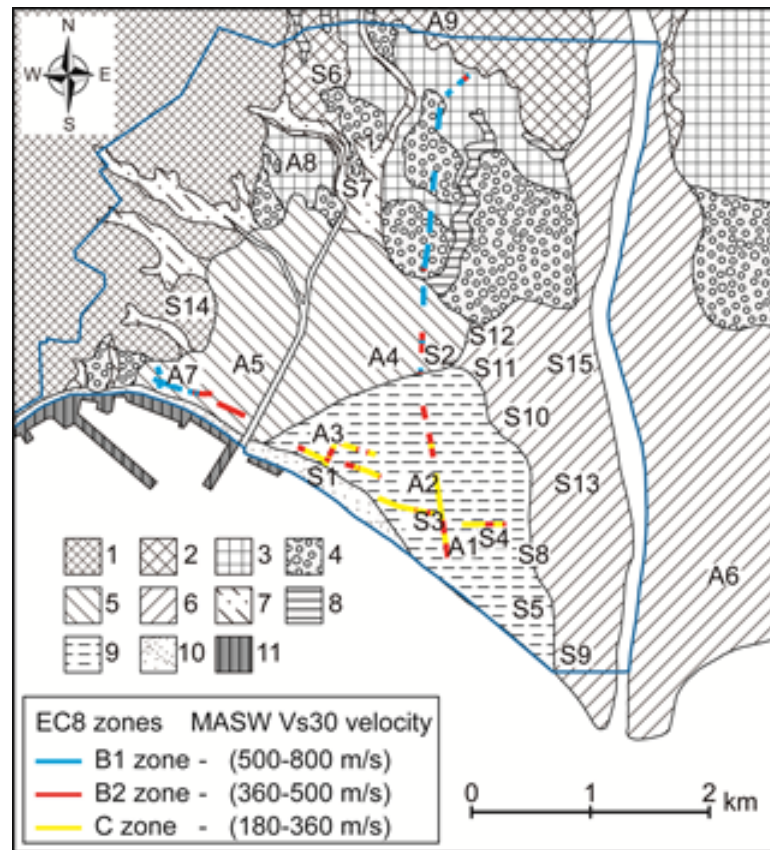


Figura 4.1: Mapa que clasifica la zona de estudio en base a los materiales depositados y su morfología. 1: Zona de montaña, 2: Zona de colina con fuerte pendiente, 3: Zona de colina con pendiente suave, 4: Abanico aluvial del Pleistoceno, 5: Abanico aluvial I del Holoceno, 6: Abanico aluvial II del Holoceno, 7: Valle I, 8: Valle II, 9: Llanura de inundación, 10: Zonas bajas costeras, 11: Terrenos ganados al mar. En la figura se indica la localización de los SPACs (del A1 al A9), los perfiles MASW y los perfiles de sismica de refracción (del S1 al S15).

en la Figura 4.1), se construyó sobre tierras bajas, formadas por la superposición de los dos abanicos aluviales, y presenta la mayor potencia de sedimentos. Las zonas topográficamente más altas corresponden a las situadas por donde discurre el río Belén, donde los valles han cortado la topografía dejando de forma residual los depósitos de gravas en las partes superiores que forman pequeñas ondulaciones de la topografía. La parte superior de este abanico aluvial localizado en la zona de colina presenta una pendiente suave (código 3 en la Figura 4.1). La parte topográficamente

más baja de este abanico aluvial presenta una pendiente aún más suave donde ha sufrido una menor erosión y donde los materiales son del Pleistoceno (código 4 en la Figura 4.1). El mismo abanico aluvial se puede observar en la zona costera izquierda del río Andarax. La zona de inundación es el área de la zona de estudio que presenta las peores condiciones de suelo con espesores de arcillas y margas superiores a los 8 metros. Las zonas costeras de topografía más baja cortan los depósitos del Holoceno y los depósitos de los niveles superiores del Pleistoceno. Por otro lado, la zona identificada como zona ganada al mar, y donde se sitúa el puerto comercial de la ciudad de Almería, la componen escombros procedentes de la demolición de edificios. Por todo lo anterior, las condiciones de licuefacción son potencialmente altas en las zonas siguientes: la llanura de inundación; la zona situada sobre el abanico aluvial II de materiales del Holoceno; y en la zona ganada al mar, formada por materiales de escombros.

Se puede observar, además, la posición de los perfiles MASW realizados en la ciudad de Almería y su relación espacial con las estructuras geológicas presentes en el área de estudio en la Figura 4.1.

4.2. Estudios previos en la zona

La estructura superficial del terreno en el área urbana de la ciudad de Almería ha sido analizada a partir de datos geológicos, geotécnicos y geofísicos (Navarro et al., 2001), lo que permitió definir las unidades litológicas presentes en el área de estudio y caracterizarlas en términos de valores N-SPT y de velocidad de cizalla.

La estructura V_{s30} del terreno en la ciudad de Almería se determinó a partir de medidas simultáneas de ruido ambiental (Gaspar-Escribano et al., 2010), usando una red circular formada por seis sensores de componente vertical VSE-15D, cinco de ellos distribuidos simétricamente a lo largo de una circunferencia de radio R , con un sexto sensor situado en el centro. Las mediciones se llevaron a cabo en nueve espacios abiertos de la ciudad, situados en diferentes condiciones de suelo (Fig. 4.1). Los radios utilizados variaron entre 1.5 y 94 metros en función del espesor previsto de sedimentos a muestrear y de la superficie utilizable en cada punto. El tiempo de grabación fue de 30 minutos y la señal fue muestreada a 100 mps. Los registros de las seis estaciones

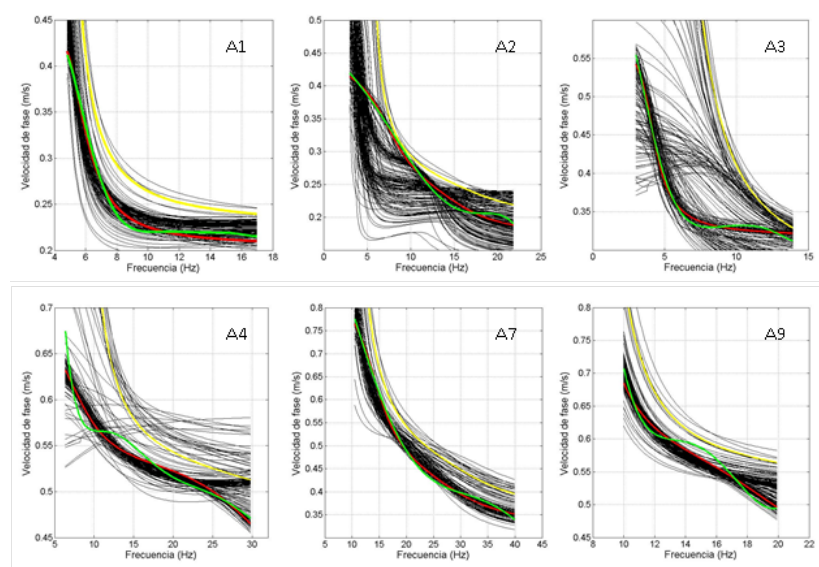


Figura 4.2: Algunos ejemplos de curvas de dispersión obtenidas (color verde), curva de dispersión obtenida a partir del modelo inicial (color amarillo) y curva de dispersión teórica (color rojo), por el método SPAC.

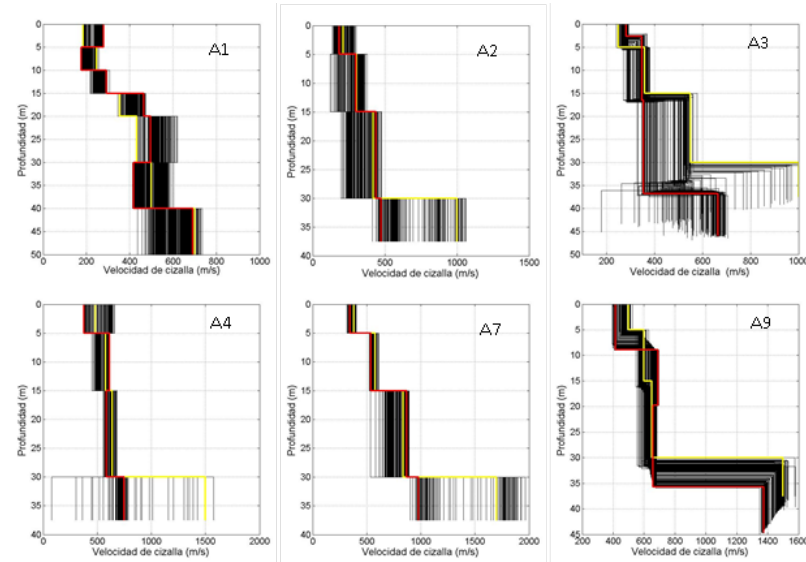


Figura 4.3: Algunos ejemplos de modelos de velocidad de cizalla obtenidos (color rojo) y el modelo inicial utilizado (color amarillo) por el método SPAC.

Nombre	Lugar	Radios (m)	Δf (Hz)	ΔCR (m/seg)	ΔZ (m)	$\Delta \beta$ (m/seg)	V_{s30} (m/seg)
A1	Vega de Acá	5-10-20-40	4.8 – 17.0	215 – 412	0 – 50.0	176 – 625	293
A2	Nicolás Salmerón	2.5-5-10-20	3.0 – 21.8	191 – 419	0 – 37.5	185 – 474	317
A3	Rafael Alberti	5-10-20	3.0 – 13.9	312 – 554	0 – 46.0	283 – 665	359
A4	Adela Díaz	2.5-5-10-20	6.4 – 29.8	471 – 674	0 – 37.5	378 – 748	595
A5	Compañía de María	2.5-5-10-18	7.0 – 20.0	288 – 701	0 – 37.5	214 – 824	490
A6	Desaladora	6-12-25-50-94	2.0 – 18.0	257 – 904	0 – 122	293 – 1136	368
A7	Gobierno Militar	1.5-3-5-10	10.5 – 30.0	397 – 775	0 – 37.5	345 – 997	596
A8	Colegio Goya	2-4-7.5-15	10.0 – 25.0	362 – 882	0 – 37.5	290 – 1711	513
A9	H. Torrecardenas	3-6-12-25	10.0 – 19.9	495 – 707	0 – 44.6	415 – 1374	564

Cuadro 4.1: Características de las configuraciones utilizadas, curvas de dispersión, rango de valores de velocidad de cizalla y estructura promedio V_{s30} para el método SPAC.

fueron tratados utilizando la forma original del método SPAC (Aki, 1957). Todas las señales han sido ventaneadas a intervalos de 20 segundos con un solapamiento del 80 % y pasadas al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Los espectros complejos han sido promediados para las estaciones sobre la circunferencia y divididos por el correspondiente a la estación central. El resultado es el coeficiente de correlación $\rho(f, R)$, el cual se relaciona con la velocidad de fase de las ondas Rayleigh $cR(f)$. Las curvas de dispersión se calcularon para diferentes rangos de longitud de onda en función del radio utilizado y posteriormente se combinaron para obtener una única curva de dispersión $cR(\omega)$ para cada sitio (Fig. 4.2). Las frecuencias de las curvas obtenidas varían entre 2.0 y 29.8 Hz y los valores de la velocidad de fase están en el rango 191 - 904 m/s (Cuadro 4.1). En general, se observa una buena correlación entre las formas de la curva de dispersión y las condiciones geológicas de cada sitio, a pesar de las variaciones laterales entre formaciones geológicas adyacentes.

El modelo de velocidad de cizalla en cada sitio se determinó a partir de la inversión estocástica de la curva de dispersión observada, usando un modelo inicial de partida construido a partir de la información geotécnica obtenida en el área de estudio y de las propias curvas de dispersión, empleando el criterio $\lambda/3$ (Tokimatsu, 1995). Algunos perfiles de velocidad de cizalla obtenidos en este estudio se muestran en la Figura 4.3. El valor promedio de velocidad de cizalla para los treinta primeros metros (V_{s30}) fue calculado para cada sitio (Cuadro 4.1), obteniéndose valores comprendidos entre 293 y 596 m/s (Cuadro 4.1).

5

Resultados obtenidos y discusión

*“Hicimos cuanto se nos ocurrió
hasta que agotamos el presupuesto.”*

– John A. Hudson

5.1. Resultados

La localización y denominación de cada uno de los perfiles MASW que forman parte de las dos grandes líneas sísmicas que se han llevado acabo en este estudio, en la ciudad de Almería, se pueden observar en la Figura 5.1. Por otro lado, en la Figura 4.1 (Capítulo 4) se pueden apreciar los diferentes materiales geológicos sobre los que están situados estos perfiles MASW, además de mostrar las estaciones de medida SPAC que están localizadas en las proximidades de cada perfil sísmico.

En términos generales, se puede decir que se ha encontrado una elevada similitud entre los valores obtenidos en estaciones próximas con el método SPAC y con el método MASW, clasificando los materiales del suelo para una misma categoría según el Eurocódigo 8 (Eurocode 8, EN 1998). Para abordar este tema en más detalle realizamos un nuevo estudio que se ha presentado en 2014 en Estambul (Turquía) (Figura 5.2) (Navarro et al., 2014b). En cuanto a los resultados obtenidos con los perfiles de refracción sísmica su importancia no es tan relevante al no haberse alcanzado suficiente profundidad de investigación. Por ello, tanto en la descripción de

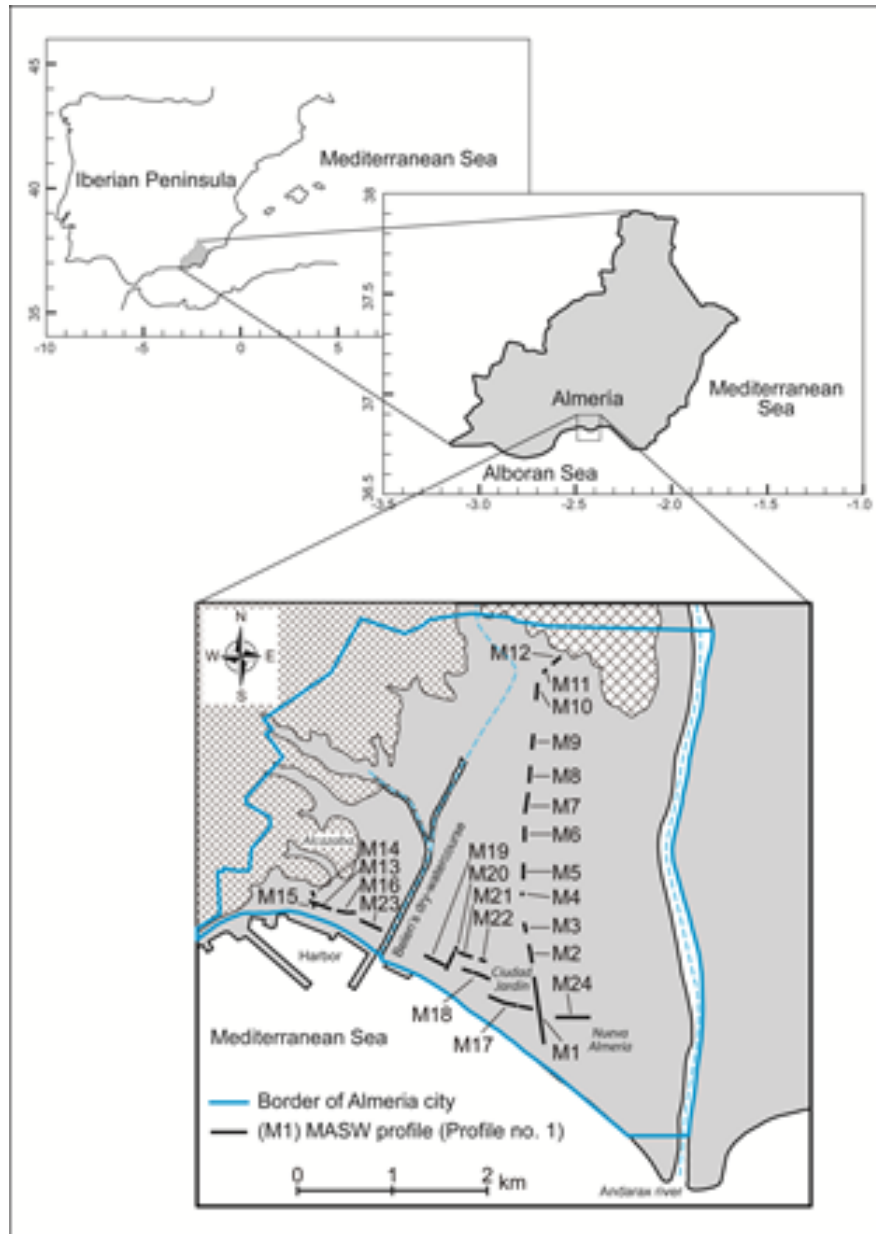


Figura 5.1: Mapa de la zona de estudio con la situación de los perfiles MASW.

los resultados como en su discusión se centrará principalmente en la información aportada por las otras técnicas (SPAC y MASW). En este estudio, con la finalidad de apreciar mejor el contraste de velocidades en el terreno y poder comparar los

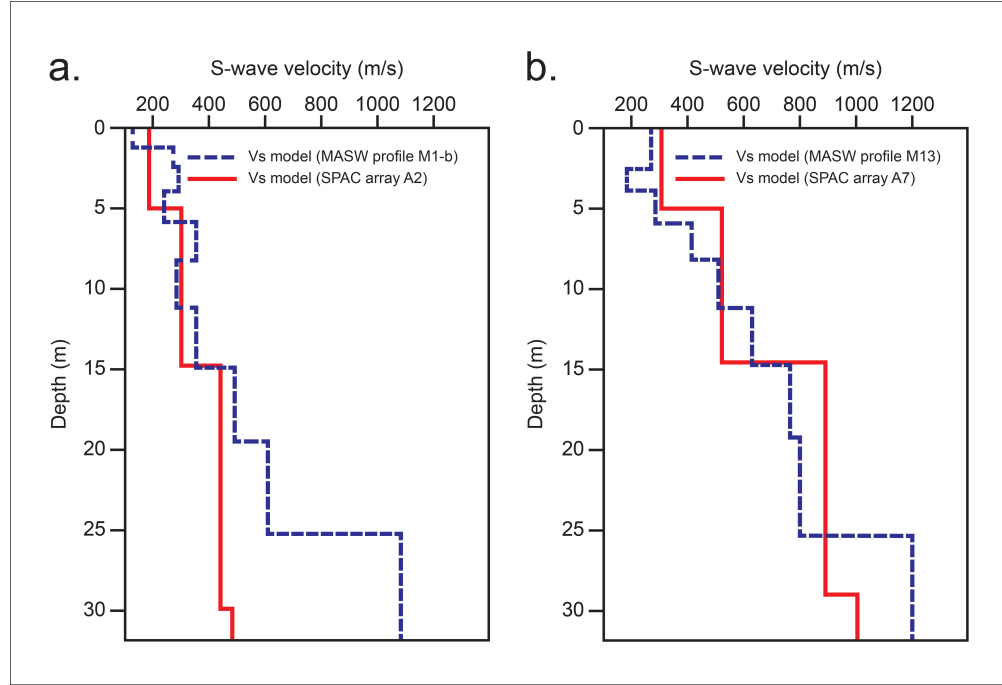


Figura 5.2: Ejemplo comparativo de perfiles de velocidad de cizalla. a) Perfil V_s en el punto A2 del método SPAC (color rojo, $V_{s30} = 317$ m/s) y el perfil V_s en la sección M1-b del método MASW (color azul, $V_{s30} = 352$ m/s); b) Perfil V_s en el punto A7 a partir del método SPAC (color rojo, $V_{s30} = 596$ m/s) y perfil V_s en la sección M13 de método MASW (color azul, $V_{s30} = 603$ m/s).

resultados con los obtenidos en estudios previos por el método SPAC de manera más precisa, el tipo B del Eurocódigo 8 ha sido dividido en dos subtipos: B1 con valores V_{s30} comprendidos entre 500 y 800 m/s; B2 con valores V_{s30} desde 360 a 500 m/s. Así, el perfil MASW M1, llevado a cabo en la llanura de inundación, presenta en sus primeros 100 metros unos valores V_{s30} comprendidos entre los 360 m/s y los 500 m/s (véase Cuadro 5.1), lo que clasifica esta área como B2 según el Eurocode 8 (Figura 5.3). Sin embargo, el resto del perfil M1, unos 600 metros, clasifica el suelo como tipo C (180 – 360 m/s), al igual que el SPAC denominado A2 con un valor de 317 m/s. Otro SPAC, denominado A3, proporcionó un valor V_{s30} de 359 m/s (zona C) para la zona de inundación en correspondencia con los valores obtenidos a través de los perfiles MASW próximos (M20 y M21) (Figura 5.3).

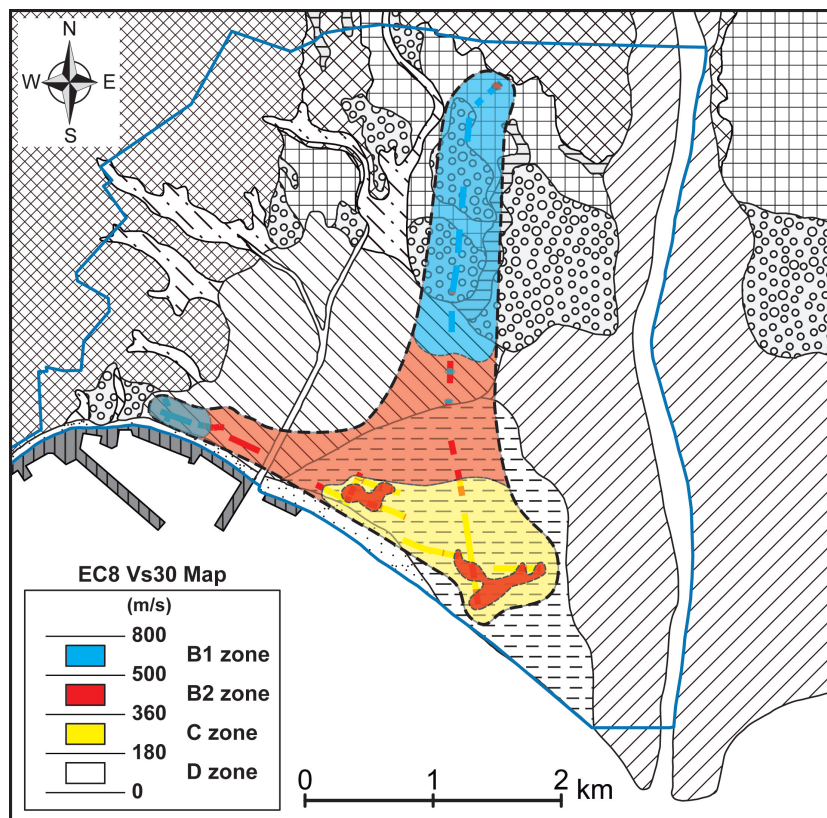


Figura 5.3: Mapa de valores V_{s30} a partir de los perfiles MASW para la ciudad de Almería siguiendo criterios del clasificación del suelo según el Eurocode 8 (EN, 1998).

Los SPACs A4, A5 y A7 situados sobre materiales del Holoceno pertenecientes al abanico aluvial I (Figura 4.1) presentaron valores de V_{s30} más altos, entre los cuales destacan el SPAC A4 con un valor V_{s30} de 595 m/s (zona B1 según el EC8) y el SPAC A7 con un valor de 596 m/s (zona B1). Tanto en la Figura 4.1 como en la Figura 5.3 se puede observar como aquellos perfiles MASW próximos a las posiciones de los SPACs anteriores (M4, M5 y M13) ofrecen valores de V_{s30} muy similares. De hecho, en la Figura 5.3 se destacan unos puntos oscuros aislados (rango de valores para la zona B1) donde la posición del punto inferior coincidiría con la posición del SPAC A4. Sin embargo, se debe señalar que el método MASW ofrece un mayor detalle en las posibles variaciones de los rangos de valores V_{s30} , a pesar de la alta correspondencia con aquellos valores obtenidos a través del SPAC, puesto

Perfil	Localización	Morfología	Longitud (m)	Intervalo V_{s30} (m/s)	Valor medio V_{s30} (m/s)
M1	Avda. Mediterráneo	Llanura de inundación	700	292.97 - 383.35	352.06
M2	Avda. Mediterráneo	Llanura de inundación	200	336.05 - 411.96	366.56
M3	Avda. Mediterráneo	Llanura de inundación	110	335.43 - 482.80	419.31
M4	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial I del Holoceno	40	479.41 - 535.05	505.31
M5	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial I del Holoceno	170	463.19 - 698.94	537.54
M6	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial I del Holoceno	160	540.45 - 769.61	640.00
M7	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial del Pleistoceno	220	470.88 - 624.08	547.11
M8	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial del Pleistoceno	180	522.07 - 611.19	573.58
M9	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial del Pleistoceno	160	541.94 - 703.49	605.24
M10	Avda. Mediterráneo	Abanico aluvial del Pleistoceno	180	523.21 - 649.00	566.16
M11	Avda. Mediterráneo	Colina con pendiente suave	60	524.76 - 643.32	568.95
M12	Avda. Mediterráneo	Colina con pendiente suave	120	416.39 - 637.36	522.02
M13	Calle Pedro Jover	Abanico aluvial I del Holoceno	250	493.76 - 762.47	603.28
M14	Calle San Juan	Abanico aluvial I del Holoceno	70	555.42 - 608.54	585.22
M15	Calle San Juan	Abanico aluvial I del Holoceno	50	537.11 - 604.43	566.88
M16	Calle Braulio Moreno	Abanico aluvial I del Holoceno	200	406.45 - 727.14	501.53
M17	Calle Bilbao	Llanura de inundación	480	298.90 - 411.72	332.80
M18	Calle Lérida	Llanura de inundación	310	326.20 - 445.98	355.55
M19	Calle José Morales Abad	Llanura de inundación	240	314.38 - 434.31	353.55
M20	Calle La Marina	Llanura de inundación	270	317.27 - 497.32	371.75
M21	Calle Chile	Llanura de inundación	160	329.74 - 377.82	353.96
M22	Calle Chile	Llanura de inundación	80	332.78 - 387.83	348.71
M23	Calle Gerona	Abanico aluvial I del Holoceno	250	375.13 - 507.06	408.68
M24	Avenida Adolfo Suárez	Llanura de inundación	360	306.79 - 376.08	345.09

Cuadro 5.1: Características de las configuraciones utilizadas, rango de valores de velocidad de cizalla y estructura promedio V_{s30} para el método MASW.

que como se ha comentado anteriormente, estos valores se obtenían cada diez metros de perfil sísmico. Así, hay zonas pertenecientes al abanico aluvial I donde algunos perfiles MASW reflejaron valores inferiores a 500 m/s, lo que según el Eurocode 8 clasifica esas áreas como zonas B2. Lo contrario también se ha dado, es decir, se tiene el caso de la zona de inundación donde los tres SPACs realizados (A1, A2 y A3) caracterizaron el área como zona C. Sin embargo, la información aportada por los perfiles MASW, que cubrieron una mayor zona investigada, ha sido capaz de poner de manifiesto pequeñas áreas clasificadas como zona B2 dentro de la zona de inundación (Figura 4.1). El SPAC A9, situado próximo al hospital Torrecárdenas, se caracteriza por ser una zona de colina con fuerte pendiente (código 2 en la Figura 4.1). Los resultados muestran un valor V_{s30} por encima de los 500 m/s, caracterizando la zona como B1 según el EC8. Los perfiles MASW más próximos a dicha estación también han mostrado valores dentro del mismo rango, comprendidos entre 500 y 800 m/s. Finalmente, el SPAC A8, situado sobre una zona diferente y caracterizada por presentar una morfología de colina con pendiente suave (código 3 en la Figura 4.1), ofreció un valor de V_{s30} de 513 m/s, lo que caracteriza este tipo de área como zona B1. Próximo a este SPAC no se realizó ningún perfil MASW. No obstante, los perfiles

MASW realizados sobre materiales geológicos equivalentes también ofrecieron valores dentro del rango de la zona B1 (Figura 5.3).

Como aportación final, la información obtenida mediante el uso de los métodos MASW y SPAC nos ha permitido la creación de nuevos mapas de valores medios de velocidad de las ondas de cizalla según aumenta la profundidad (V_{s5} , V_{s10} , V_{s15} , V_{s20} , V_{s25} y V_{s30}) que nos permiten evaluar la composición del subsuelo y sus características atendiendo a su estructura más superficial (Figura 5.5). La creación de estos nuevos mapas nos aporta una visión más cercana a las variaciones de velocidad de las ondas de cizalla según la composición del terreno y a su vez, nos presenta como se van introduciendo los cambios de composición del terreno según aumentamos la profundidad.

5.2. Discusión

En base a los resultados comentados en la sección anterior, se desprende que los valores más bajos de velocidad de la onda de cizalla (180 – 360 m/s) corresponden a los medidos por los perfiles sísmicos M1, M2, M18, M19, M20, M21, M22 y M24 (Cuadro 5.1). Estos valores clasificarían el suelo como zona C según el Eurocode 8. Estos perfiles se desplegaron sobre la llanura de inundación, por lo que es esta área la que presenta las peores condiciones geotécnicas del suelo, como también ha quedado reflejado por las estaciones de SPACs (A1, A2 y A3) situadas en dicha área. Por ello, a esta área se debería prestar especial atención, máxime cuando es hacia esta zona donde se está produciendo el crecimiento de la ciudad de Almería. La Figura 5.3 indica que en esta zona de inundación también existen pequeñas áreas que se clasifican como zona B2 (360 – 500 m/s). Aunque estas mayores velocidades de la onda de cizalla significa una mejora en las condiciones geotécnicas de estos suelos, sin embargo, suelos tipo B2 también deben ser tenidos en cuenta desde el punto de vista de la edificabilidad por su riesgo sísmico tal y como indica (Kanli et al., 2006), donde menciona daños en edificios situados en ese tipo de zona ocurridos durante el terremoto de Dinar de octubre de 1995.

Los perfiles MASW identificados como M4, M5, M12, M16 y M23, situados sobre materiales del Holoceno pertenecientes al abanico aluvial I, también clasificaron

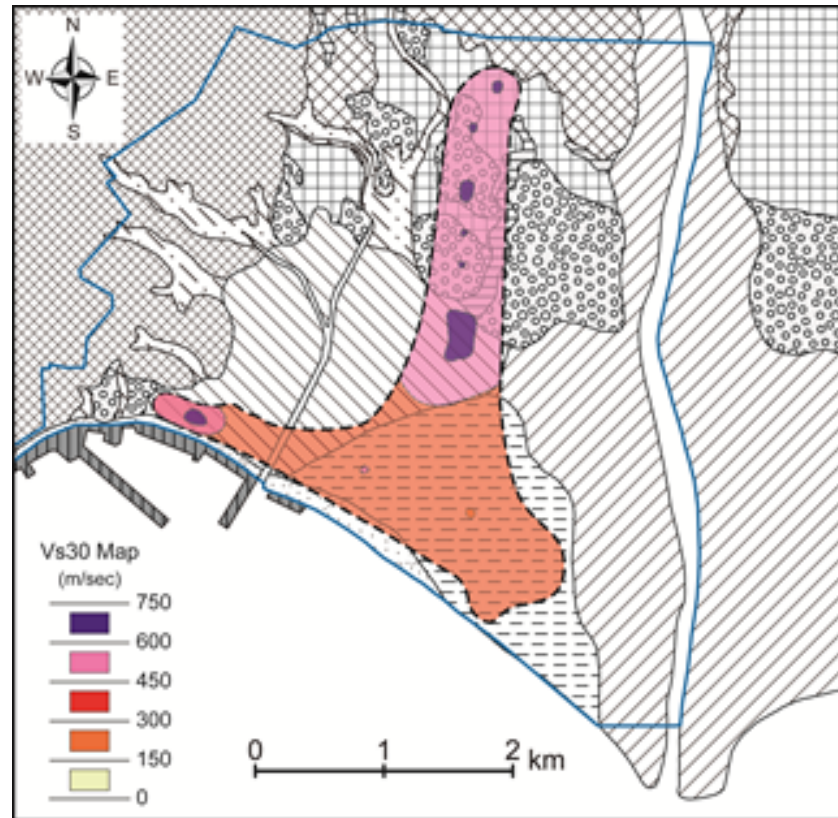


Figura 5.4: Mapa de valores V_{s30} a partir de los perfiles MASW para la ciudad de Almería siguiendo unos rangos personalizados a la zona de estudio.

algunas áreas como suelo B2, por lo que estas zonas también deberían ser tenidas en cuenta. Mencionar que los resultados obtenidos a partir del sondeo de SPAC A5, próximo a los perfiles M16 y M23, también clasifica el área como suelo B2. Respecto a la zona sur-oeste del abanico aluvial I, los perfiles sísmicos ofrecieron un mejor comportamiento del suelo en base a los valores de velocidad, los cuales estuvieron por encima de los 500 m/s (zona B1 – EC8). Este extremo también fue confirmado por la estación SPAC A7 con valores de 596 m/s. Los perfiles MASW etiquetados como M6, M7, M8, M9, M10, M11 y M12 situados sobre el abanico aluvial del Pleistoceno y sobre una zona de colina caracterizada por disponer de una pendiente suave clasificaron estos suelos como zonas B1 (500 – 800 m/s), es decir un comportamiento del suelo bueno. Estos datos también estuvieron en correspondencia con aquellos

obtenidos por medio de estaciones SPACs, concretamente las estaciones situados al norte de la ciudad de Almería: A8 y A9, que dieron valores V_{s30} de 513 m/s y 564 m/s, respectivamente.

Resumiendo, y empleando como base la Figura 5.4, la cual representa los valores V_{s30} descritos anteriormente, pero según intervalos de valores más apropiados al área de estudio, se puede observar que las zonas de la ciudad de Almería con mejor comportamiento esperable del suelo frente a un sismo se encuentran en la zona norte y oeste, con velocidades de los 450 a los 750 m/s. Por otro lado, los suelos que tienen un peor comportamiento sísmico esperable corresponden a las zonas con velocidades inferiores a los 450 m/s.

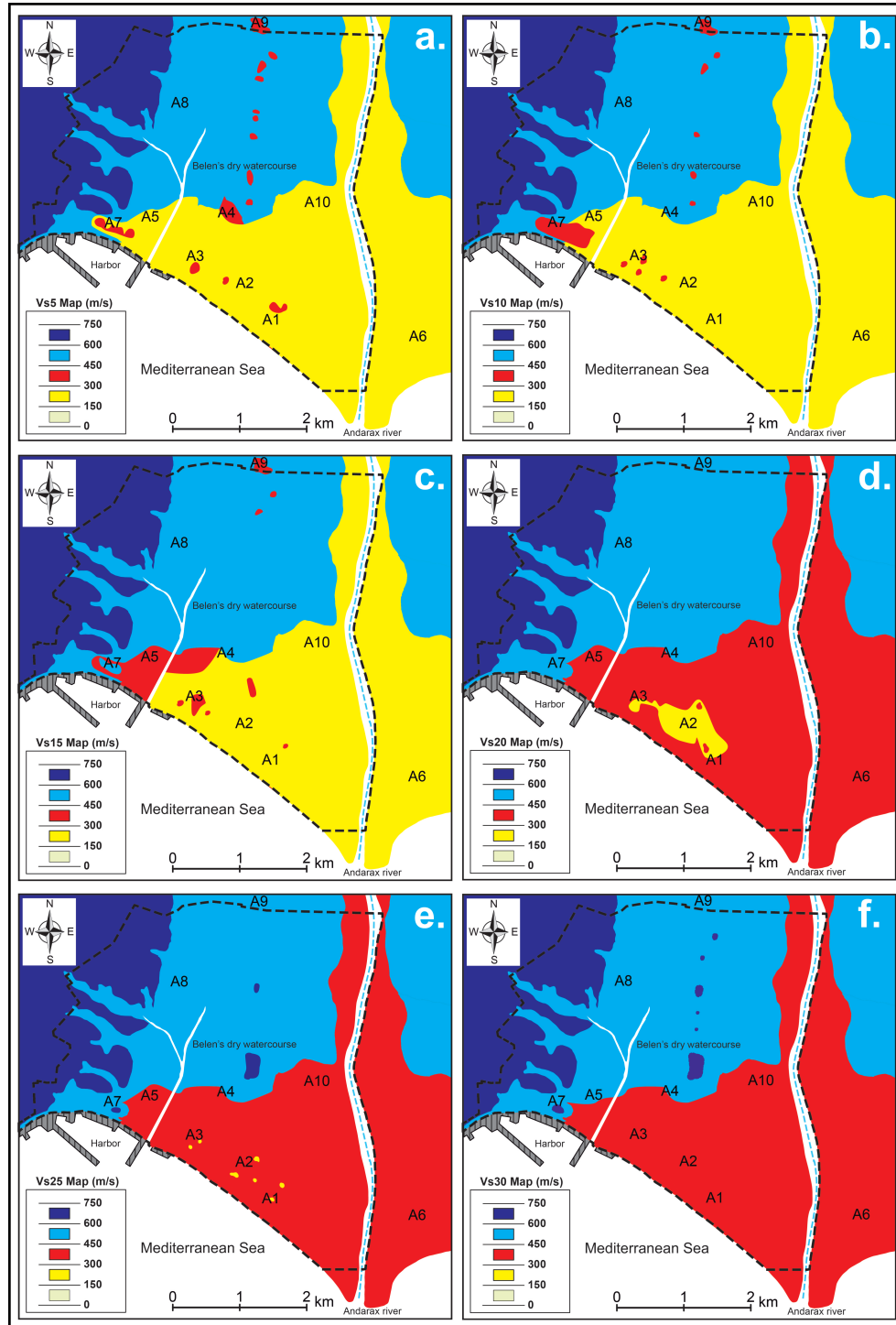


Figura 5.5: Mapas de distribución de la velocidad media de onda de cizalla (V_s) de la ciudad de Almería a distintas profundidades.

6

Conclusiones y perspectivas futuras

“En el lenguaje científico la claridad es la única estética permitida.”

– Gregorio Marañón

El estudio que aquí se ha abordado pone de manifiesto la idoneidad de la técnica MASW para estimar las condiciones de velocidad de cizalla superficial del suelo, demostrando además como el orden de magnitud de los valores de velocidad de la onda de cizalla está en relación directa con el tipo de geología que los perfiles sísmicos atraviesan. Resumiendo, se puede establecer que las zonas de la ciudad de Almería con mejor comportamiento esperable del suelo frente a un sismo son la zona norte, coincidiendo con los Barrios San Luís y Torrecárdenas, y la zona oeste, a la que pertenecen Centro histórico y Cerro San Cristóbal. En el otro extremo se encontraría la zona de inundación a la que pertenecen Ciudad Jardín, Nueva Almería y Zapillo. También en las zonas del abanico aluvial I, como Nicolás Salmerón u Oliveros, los suelos tienen un peor comportamiento sísmico.

El estudio también subraya la significativa correspondencia entre los valores obtenidos a través de SPAC y los procedentes de perfiles próximos de MASW. Por ello, estas técnicas, que presentan distintas propiedades de alcance en profundidad y de resolución espacial, son dos técnicas que se complementan. El método MASW tiene una importante resolución para resolver el modelo V_s para los primeros metros de

profundidad y el método SPAC fácilmente permite obtener el modelo de V_s para las capas más profundas. La aplicación combinada de ambos métodos constituye una poderosa herramienta para la realización de estudios futuros de microzonificación sísmica en zonas urbanas.

Además, es importante destacar que con los resultados obtenidos con los métodos MASW y SPAC se han podido elaborar mapas de valores medios de velocidad de las ondas de cizalla (V_s) para diferentes profundidades (5, 10, 15, 20, 25 y 30 metros). Los mapas obtenidos aportan una nueva forma de evaluar la influencia de los materiales más superficiales del subsuelo sobre las características geotécnicas del suelo en base a los valores V_s . Esta nueva forma de presentar los valores de V_s , que permite destacar la influencia de los materiales más superficiales, aporta nuevos criterios a tener en cuenta para la elaboración de los mapas de microzonación sísmica a considerar en los futuros planes de ordenación urbana de la ciudad.

Con vistas al futuro se pretende realizar nuevos perfiles a lo largo de la ciudad de Almería para poder maximizar la realización de un mapa de microzonificación completo y poder perfeccionar la información relativa al mapa geológico de que se dispone. Con los modelos de V_s obtenidos mediante la aplicación de los métodos sísmicos (MASW y SPAC) y los acelerogramas de los terremotos más importantes ocurridos en la época instrumental en la ciudad de Almería, en la actualidad, se está trabajando en la caracterización de la severidad de estos terremotos. Esta caracterización se basa en mapas de distribución de valores de PGA (Aceleración pico del suelo), PGV (Velocidad pico del suelo), AI (Intensidad de Arias) y las amplificaciones y periodos naturales del terreno. De manera contemporánea, el departamento sigue trabajando con este método, entre otros lugares, en España (ciudad de Lorca) y Portugal. Se estima que los resultados de estos nuevos análisis se publicarán próximamente.

Bibliografía

- K. Aki. Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bull. Earthquake Research Institute*, (35):415–456, 1957.
- F.J. Alcalá-García, M. Navarro, A. García-Jerez, F. Vidal, C. Creus, y T. Enomoto. Geología de la ciudad de Lorca (Murcia, España). Una base para evaluar el riesgo sísmico. En *7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. 2013.
- F.J. Alcalá-García, M. Navarro, A. García-Jerez, F. Vidal, I. Matsuda, M. Espinar, y J.A. Esquivel. Zonación geológica preliminar de la ciudad de Lorca (Murcia, España). Aplicación a la gestión del riesgo sísmico. En *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. 2006.
- F. Aldaya y J. García-Dueñas. *Mapa Geológico de España, Almería-Garrucha*. Instituto Geológico y Minero de España, 1971.
- G. Alguacil, F. Vidal, M. Navarro M, A. García-Jerez, y J. Pérez Muelas. Characterization of earthquake shaking severity in the town of Lorca during the May 11, 2011 event. *Bull. Earthquake Engineering*, (12):1889 – 1908, 2013.
- M.J. Allés Abad. *Parámetros del movimiento del suelo de sismos de Almería*. Trabajo fin de máster de Estructuras, Universidad de Granada, 2013.
- Eurocode 8. Design of structures for earthquakes resistance - Parte 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), EN 1998.
- M.E. Everett. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge, 2013.

- J.M. Gaspar-Escribano, M. Navarro, B. Benito, A. García-Jerez, y F. Vidal. From regional- to local-scale seismic hazard assessment: examples from Southern Spain. *Bull. Earthquake Engineering*, (8):1547–1567, 2010.
- Gobierno de España. Comisión permanente de normas sismorresistentes. 2014. URL <https://www.fomento.gob.es>.
- L. González-García, M. Navarro, P. Martínez-Pagan, J. Pérez-Cuevas, A. García-Jerez, y F. Vidal. Estructura de velocidad superficial de la ciudad de Almería (SE España) a partir del análisis MASW. En *8th Asamblea Luso-Española de Gedodesia y Geofísica*, págs. 57–64. 2014.
- D.H. Griffiths y R.F. King. *Geofísica Aplicada para Ingenieros y Geólogos*. Paraninfo, 1972.
- Instituto Andaluz de Geofísica. 2014. URL <https://www.ugr.es/iag/>.
- A.I. Kanli, P. Tildy, Z. Prónay, A. Pinar, y L. Hermann. V_{s30} mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey. *Geophysical Journal International*, (165):223–235, 2006.
- P. Martínez-Pagán, M. Navarro, J. Pérez-Cuevas, F.J. Alcalá, A. García-Jerez, y S. Sandoval-Castaño. Shear-wave velocity based seismic microzonation of Lorca city (SE Spain) from MASW analysis. *Near Surface Geophysics*, (12), 2014. En publicación.
- P. Martínez-Pagán, M. Navarro, J. Pérez-Cuevas, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, S. Sandoval-Castaño, y I. Alhama. Comparative study of SPAC and MASW methods to obtain the V_{s30} for seismic site effect evaluation in Lorca town, SE Spain. En *18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2012.
- P. Martínez-Pagán, M. Navarro, J. Pérez-Cuevas, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, S. Sandoval-Castaño, y F. Segura Quiles. Shear wave velocity structure for seismic microzonation of Lorca town (SE Spain) from MASW analysis. En *19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2013.

- R.D. Miller, C.B. Park, J.M. Ivanov, J. Xia, D.R. Laffen, y C. Gratton. MASW to investigate anomalous near-surface materials at the Indian Refinery in Lawrenceville, Illinois, 2000. KGS Open-file Report 2000-4.
- M. Navarro, T. Enomoto, F.J. Sánchez, I. Matsuda, T. Iwatate, A.M. Posadas, F. Luzón, F. Vidal, y K. Seo. Surface soil effects study using short-period microtremor observations in Almería city, Southern Spain. *Pure and Applied Geophysics*, (158):2481–2497, 2001.
- M. Navarro, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, F. Vidal, y C. Enomoto. Local site effect microzonation of Lorca town (Southern Spain). *Bull. of Earthquake Engineering*, (12):1933–1959, 2014a.
- M. Navarro, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, F. Vidal, T. Enomoto, F. Luzón, y C. Creus. V_{s30} structure of Lorca town (SE Spain) from ambient noise array observations. En *31st General Assembly of the European Seismological Commission*. 2008.
- M. Navarro, A. García-Jerez, F. Vidal, J.M. Azañon, M. Feriche, y T. Enomoto. V_{s30} structure of Granada town (Southern Spain) from the ambient noise array observations. En *14th European Conference on Earthquake Engineering*. 2010.
- M. Navarro, P. Martínez-Pagan, A. García-Jerez, J. Pérez-Cuevas, L. González-García, F. Vidal, y T. Enomoto. Comparative study of SPAC and MASW methods to obtain the V_{s30} structure for seismic site effect evaluation in Almeria town, SE SPAIN. En *Second European conference on earthquake engineering and seismology*. 2014b.
- National Earthquake Hazards Reduction Program- NEHRP. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1 – Provisions and Part 2 – Commentary. Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2001.
- The University of Kansas. Kansas geological survey. 2014. URL <http://www.kgs.ku.edu>.

- H. Okada. *The microtremor survey method*. Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- P. Martínez Pagán. *Prospección Geofísica - 2*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- C.B. Park. MASW-horizontal resolution of 2d shear-velocity (V_s) mapping, 2005. KGS Open-file Report 2005-4.
- C.B. Park. MASW for geotechnical site investigation. *The Leading Edge*, 32(6):656–662, 2014.
- C.B. Park y R.D. Miller. MASW to map shear-wave velocity of soil, 2004. KGS Open-file Report 2004-30.
- C.B. Park y R.D. Miller. Seismic characterization of wind turbine sites in Kansas by the MASW method, 2005. KGS Open-file Report 2005-23.
- C.B. Park, R.D. Miller, y J. Xia. Detection of near-surface voids using surface waves. En *SAGEEP99*. 1999.
- J.M. Reynolds. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley-Blackwell, 2011.
- V. Roma. Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16–28, 2010.
- J. Rueda y J. Mezcua. Determinación del tensor momento sísmico en tiempo real. primeros resultados en España. 2004. URL https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/informes/terremoto_navarra/tensor.htm.
- L.V. Socco, D. Boiero, C. Comina, S. Foti, y R. Wisén. Seismic characterization of an Alpine site. *Near Surface Geophysics*, 6(4):255–267, 2008.
- K. Tokimatsu. Geotechnical site characterization using surface waves. En *First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, págs. 1333 – 1368. 1995.

-
- F. Vidal. *Sismotectónica de la región Béticas-Mar de Alborán*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 1986.
- J. Xia. Delineating subsurface features with the MASW method at Maxwell AFB in Montgomery, Alabama, 2006. KGS Open-file Report 2006-1.
- J. Xia, R.D. Miller, y C.B. Park. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, (64):691–700, 1999.
- J. Xia, R.D. Miller, C.B. Park, J.A. Hunter, J.B. Harris, y J. Ivanov. Comparing shear-wave velocity profiles from multichannel analysis of surface wave with borehole measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(22):181–190, 2002.